

*Инженерия для освоения космоса***ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ELCUT ДЛЯ ПОДБОРА ПАРАМЕТРОВ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЕТАТРОНА**

Затонов И.А.

Научный руководитель: Штейн М.М., доцент, к.т.н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ivan.zatonov@yandex.ru](mailto:ivan.zatonov@yandex.ru)**USING ELCUT SOFTWARE FOR SELECTION OF BETATRON'S MAGNETIC PARAMETERS**

Zatonov I.A.

Scientific Supervisor: Associate Professor, Ph.D., Shtein M.M.

Tomsk Polytechnic University

Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [ivan.zatonov@yandex.ru](mailto:ivan.zatonov@yandex.ru)

*В данной статье рассматривается возможность применения программных пакетов для решения мультифизических задач в бетатроностроении. Указана роль радиационного контроля в аэрокосмической индустрии с использованием в качестве источника ионизирующего излучения малогабаритного импульсного бетатрона. При помощи программного пакета Elcut рассчитаны основные характеристики магнитного поля бетатрона. Исследована зависимость точности расчета от количества узлов сетки. Проанализированы фокусирующие свойства магнитного поля бетатрона.*

*The article investigates the potential of applying Elcut software to settle multipurpose objective in betatron engineering. It accentuates radiation control in aerospace industry applying small-size pulse betatron as a fount of ionizing radiation. Elcut software give opportunity to calculate main characteristic of the betatron magnetic field. Dependency of computation accuracy on the grid quantity is explored. Focusing properties of the betatron magnetic field are dissected.*

Аэрокосмическая индустрия играет важную роль в обеспечении военной безопасности, научно-технического и экономического развития Российской Федерации. На данном этапе развития своей экономики и технологий Россия переходит от мер поддержания прежнего уровня развития аэрокосмической отрасли к реализации новых амбициозных проектов с целью повышения производственного потенциала данного направления [1]. Столь важная роль в российской стратегии военно-технического и экономического развития требует от аэрокосмической индустрии высокую степень надежности, которая, в первую очередь, определяется использованием средств и методов неразрушающего контроля на всех этапах производства.

Радиационный контроль в связи с его высокой информативностью широко используется в контроле изделий, относящихся к аэрокосмической отрасли. Суть метода цифрового рентгенографического контроля - визуализация структуры объекта с идентификацией инородного материала и определением его геометрического положения в структуре контролируемого изделия. В последние годы аналогичным методом решаются и задачи авиационной безопасности. Для контроля крупногабаритных изделий и досмотра авиаконтейнеров требуются источники рентгеновского излучения с высокой энергией, в качестве которых сейчас применяются бетатроны и линейные ускорители [2]. Отличительной особенностью бетатронов являются малые габариты и низкая стоимость, что делает их конкурентоспособными, несмотря на меньшую мощность дозы излучения.

В стенах Томского политехнического университета в 1948 году был запущен первый отечественный бетатрон на энергию 4 МэВ. С тех пор ТПУ является опорным вузом не только в России, но и во всем мире, по разработке бетатронов.

При производстве бетатронов, обычно возникают трудности, связанные с их настройкой, которая заключается в подборе параметров магнитного поля для получения номинальной энергии электронов и максимальной мощности дозы.

Настройка бетатронов производится несколькими способами:

- Настройка бетатрона путем перебора составных частей, влияющих на распределение магнитного поля бетатрона и измерения получаемой для каждого варианта мощности дозы излучения. Для уверенности в том, что бетатрон хорошо настроен и дает близкую к максимально-возможной мощность дозы, в таком случае требуется десятки, а иногда и сотни переборок.
- Проведение магнитных измерений и на их основе более целенаправленное изменение параметров магнитного поля в межполюсном зазоре, тогда удастся получить хороший результат за несколько переборок.

Принцип действия бетатрона основан на том, что в спадающем по радиусу и нарастающем во времени магнитном поле возможно движение электрона по круговой орбите постоянного радиуса с набором энергии. Прирост энергии за один оборот пропорционален скорости изменения магнитного потока внутри орбиты. Любое отклонение электрона от постоянной орбиты приводит к появлению магнитных сил, возвращающих его назад на эту орбиту, поэтому ее радиус  $r_0$  называется равновесным.

Одна из основных задач настройки - найти оптимальный радиус равновесной орбиты электронов, так как этот радиус определяет и энергию ускоренных электронов, и область действия магнитных фокусирующих сил, следовательно, их количество [3]. В свою очередь, наиболее полную информацию о фокусирующих свойствах магнитного поля дает его потенциальная функция [4].

В данной работе ставилась задача показать, что вместо трудоемких магнитных измерений характеристики магнитного поля для реальных конструкций бетатронов с необходимой точностью можно получить численным моделированием. Численное моделирование может существенно сократить время настройки бетатрона.

Такое моделирование возможно осуществить при помощи программных пакетов, предназначенных для конечно-элементного анализа в различных областях физики и инженерного дела, включая рассмотрение мультифизических задач. Сейчас находят применение такие пакеты, как Ansys, Comsol Multiphysics, Elcut и другие.

Для численного моделирования основных характеристик магнитного поля бетатрона был использован программный пакет Elcut, как наиболее простой и доступный. Анализ производился на примере конструкции малогабаритного бетатрона.

Геометрия электромагнита бетатрона представлена на рисунке 1.

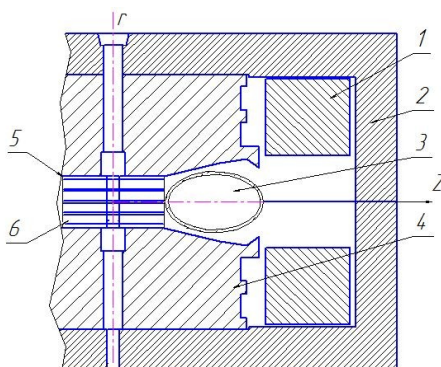


Рис. 1. Геометрическая модель бетатрона, симметричного относительно оси  $r$ , где 1- Катушка с током 12000 ампер-витков; 2- Обратный магнитопровод; 3- Камера рентгеновская бетатронная; 4- Магнитные полюса; 5- Пять одинаковых магнитных прокладок толщиной по 2,4 мм; 6- Четыре магнитные галетки толщиной по 8 мм

С учетом осесимметричной конструкции бетатрона МИБ-10 в программном пакете Elcut была начерчена геометрическая модель с последующим заданием физических параметров объектов. Работа с геометрической моделью производится в цилиндрической системе координат в полуплоскости  $zr$  ( $r \geq 0$ ).

Для задания магнитной проницаемости, в программу были занесены данные, характеризующие кривую намагничивания для электротехнической стали 3408 (Рисунок 2). Проницаемость воздушных областей и областей, занятых немагнитными материалами, равна 1. Приведенные ниже результаты соответствуют общему числу ампер-витков 24000.

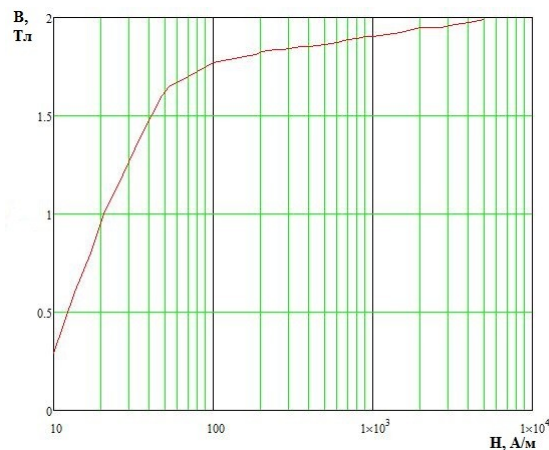


Рис. 2. Кривая намагничивания для электротехнической стали 3408

Границы выбранной расчетной области отстояли от наружного контура магнитопровода на расстоянии 20 мм. Магнитный потенциал на границе расчетной области был принят равным нулю. Дальнейшие расчеты подтвердили, что за пределами обратного магнитопровода поле, исчезающее мало, так как оно полностью экранируется материалом с большой магнитной проницаемостью.

Программа Elcut решает уравнение Пуанкаре для векторного магнитного потенциала  $A$ , но в осесимметричной задаче вычисляет связанную с ним величину-функцию потока  $\Phi = r \cdot A$ . После этого численным дифференцированием находятся составляющие вектора магнитной индукции  $B_z$  и  $B_r$ .

В первую очередь было определено значение радиуса равновесной орбиты в предположении, что орбита полностью лежит в плоскости  $z$ . Для этого в программе был исследован контур при  $z = 0$  мм на отрезке  $r \in [43; 130]$  мм и получены значения индукции в зависимости от радиуса  $B_z(r)$ .

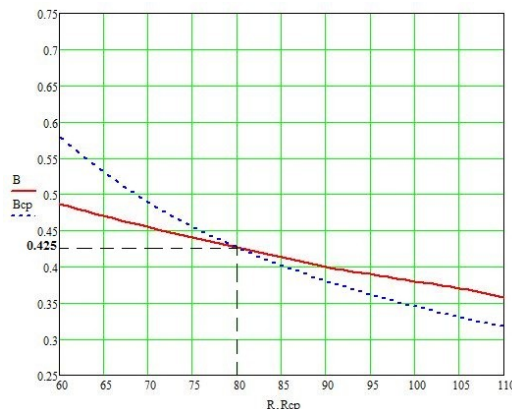


Рис. 3. Определение равновесного радиуса

Точка пересечения графика распределения индукции  $B_z$  с  $\frac{B_{cp}}{2}$  является значением равновесного радиуса (рисунок 3). При указанных выше размерах галетного блока значение равновесного радиуса составило 80 мм, а индукция в нем 0,425 Тл.

Параллельно с расчетом равновесного радиуса было определено значение энергии электронов в рассматриваемом контуре. Расчет дал величину 8 МэВ, что близко к ожидаемому значению

Показатель спадания напряженности магнитного поля в плоскости  $z=0$ , приведен на рисунке 4.

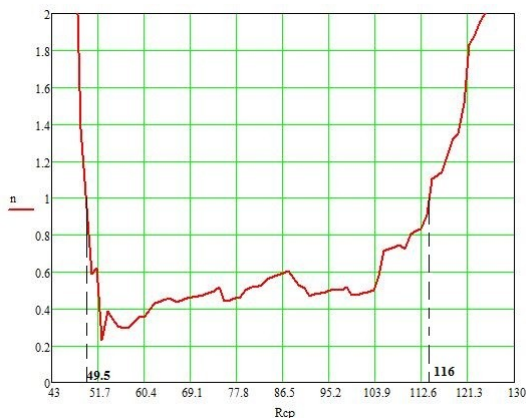


Рис. 4. Зависимость показателя спадания  $n$  от радиуса  $r$

Наличие одновременно фокусирующих сил в радиальном и аксиальном направлениях обеспечивается при выполнении неравенства  $0 < n < 1$ . Согласно полученному графику устойчивыми являются орбиты с радиусами от 49.5 до 116 мм.

Как уже упоминалось наглядной и полной характеристикой, описывающей фокусирующие свойства магнитного поля, является потенциальная функция  $V_\mu$ . Поверхность, описываемую потенциальной функцией принято называть потенциальной ямой [5].

Построенная для плоскости  $z=0$  потенциальная яма представлена на рис. 5.

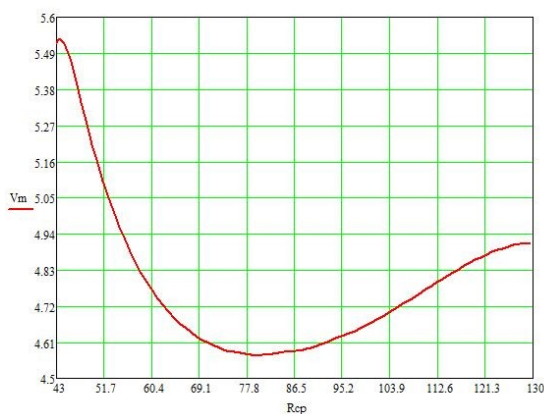


Рис. 5. Потенциальная яма для плоскости  $Z=0$

Как и следует из теории бетатрона, минимум потенциальной ямы находится на равновесном радиусе.

Для того, чтобы иметь полную картину фокусирующих сил по всему сечению межполюсного пространства, в том числе по сечению ускорительной камеры, потенциальная яма рассчитывается как функция двух координат и обычно на плоскости представляется линиями равного уровня. Контуром на рисунке 6 обозначена область, где рассчитывались значения потенциальной функции с дальнейшим построением потенциальной ямы.

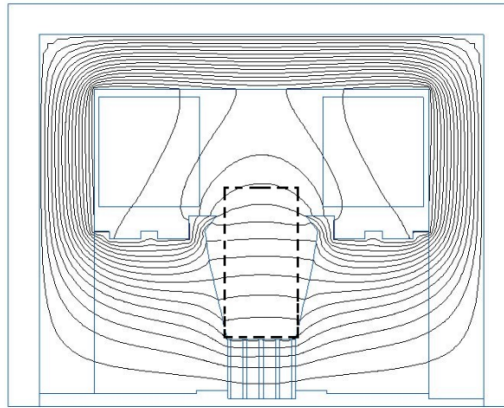


Рис. 6. Область модели, где рассчитывалась потенциальная функция

Для заданных условий расчета получаем картину потенциальной ямы, представленную на рисунке 7. Красным контуром обозначена вакуумная камера, внутри которой теоретически могут существовать любые орбиты электронов. Зеленый контур обозначает инжектор камеры. Наличие инжектора сужает полезный объем камеры, но без него бетатрон не работоспособен.

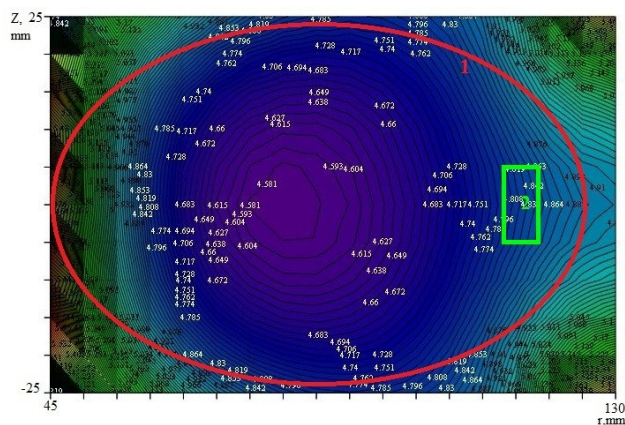


Рис. 7. График линий уровня потенциальной функции . 1- вписанная рентгеновская камера; 2-инжектор

Программная система Elcut, предназначенная для решения мультифизических задач методом конечных элементов, является эффективным средством для численного моделирования магнитного поля бетатрона. Оно во многих случаях может заменить процесс магнитных измерений и сократить время настройки бетатронов. Машинное время, затраченное на сам процесс моделирования, невелико и составило 87 секунд. Значительно большее время уходит на обработку результатов решения. В связи с этим актуальной становится задача импорта данных решения Elcut в более мощные современные программы обработки массивов данных, и создание командного файла для полной автоматизации процесса получения результатов решения в привычной и удобной для пользователя форме.

Что касается конкретных результатов моделирования представленного варианта электромагнита бетатрона, то видно, что размеры галетного блока выбраны неправильно. Равновесный радиус находится близко к инжектору и полезным является лишь малая часть поперечного сечения камеры. Радиус смещен наружу, и уже первая линия равного уровня касается инжектора (рис. 6). Только внутри этой линии могут существовать устойчивые орбиты электронов. Электроны, колебательная энергия которых выше потенциальной энергии первого уровня, могут сделать несколько оборотов, но в итоге преодолеют этот барьер и столкнутся с инжектором.

Для уменьшения равновесного радиуса следует уменьшить высоту галет и одновременно увеличить толщину немагнитных прокладок, оставив общий зазор между полюсами неизменным. Выполнив численное моделирование нескольких вариантов, можно определить приемлемое положение равновесного радиуса и соответствующую ему структуру галетного блока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов А.С. Ракетно-космическая промышленность Российской Федерации: современное состояние и перспективы и безопасность// Национальные интересы: приоритеты – 2008. – Т.1. -№ 33.- С. 43-48.
2. J. Accardo, M. Ahmad Chaudhry Radiation exposure and privacy concerns surrounding full-body scanners in airports// Journal of radiation researches. – 2014. – Vol. 7 . – P. 198-200.
3. Гришин К.С. К методике проектирования полюсов простейших бетатронов// Известия ТПИ.- 1957.- Т.87.- С.95-100.
4. Родимов Б.Н. Закономерности магнитного поля бетатрона// Известия ТПИ. -1957. –Т.87 .- С.3-10.
5. Носков Д.А. Потенциальная функция фокусирующих сил магнитного поля бетатрона и ее практическое применение при настройке ускорителей //Известия ТПИ.- 1957. – Т.87. – С. 151-156.

#### **БОРЬБА С КОНДУКТИВНЫМИ ПОМЕХАМИ В СИСТЕМЕ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ СКВАЖИННОГО ПРИБОРА**

Ильясов Б.Б.

Научный руководитель: Белянин Л.Н, доцент, к.т.н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: liyassov@tpu.ru

#### **AVOIDING CONDUCTED INTERFERENCE IN THE SYSTEM OF TEMPERATURE CONTROL OF THE DOWNHOLE TOOL**

Iliyassov B.B.

Scientific Supervisor: .Associate Professor, Ph.D., Belyanin L.N

Tomsk Polytechnic University

Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: liyassov@tpu.ru

*В данной статье описывается система термостатирования для скважинного прибора. Особенность этой системы состоит в использовании активного нагревателя и охладителя, управляемых с использованием широтно-импульсной модуляции. За основу системы взята схема термостатирования инклинометра ИГН 100-100/60-А. Однако у такой схемы присутствует серьёзный недостаток – кондуктивные помехи, которые оказывают влияние на работу скважинного источника питания, а значит, и всей электронной аппаратуры инклинометра. Во введении кратко описывает принцип работы системы термостатирования. Далее подробно рассмотрены причины кондуктивных помех, рассчитана величина провалов в отборе мощности, приведены графики, наглядно показывающие изменения сигнала. Выявлены*